

com. to EP0863 55

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平10-256673

(43) 公開日 平成10年(1998) 9月25日

(51) IntCl.<sup>9</sup>

識別記号

F I

H 0 1 S 3/18

H 0 1 S 3/18

C 0 9 K 11/00

C 0 9 K 11/00

A

11/02

11/02

A

11/08

11/08

A

11/54

11/54

CPB

CPB

審査請求 有 請求項の数 6 F D (全 10 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号

特願平9-68978

(22) 出願日

平成9年(1997) 3月7日

(71) 出願人 396020800

科学技術振興事業団

埼玉県川口市本町4丁目1番8号

(72) 発明者 川崎 雅司

神奈川県横浜市港南区日野6-11-7-303

(72) 発明者 鯉沼 秀臣

東京都杉並区荻窪3-47-8

(72) 発明者 大友 明

神奈川県大和市中央林間1-18-11 萬谷方

(72) 発明者 瀬川 勇三郎

東京都新宿区西落合2-13-17

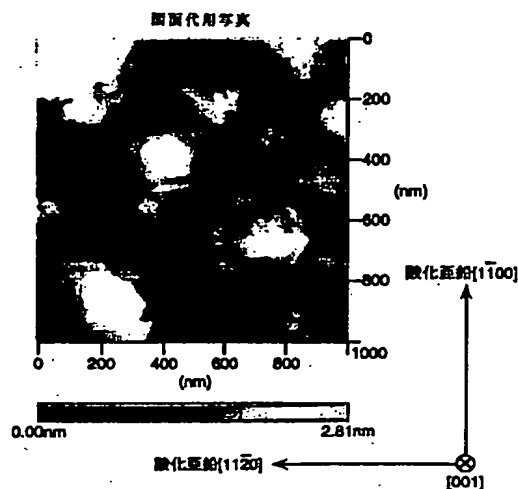
(74) 代理人 弁理士 清水 守

(54) 【発明の名称】 光半導体素子及びその製造方法

(57) 【要約】

【課題】 ZnOの温室における紫外光のレーザー発振現象に基づく光半導体素子を提供する。

【解決手段】 原子レベルで制御された酸化物エピタキシャル薄膜成長に有効なレーザー分子線エピタキシー法を用いて、サファイヤc面基板上に作製されたZnO薄膜は、X線ロッキングカーブの半値幅は0.1°と非常に高い結晶性を有している。その薄膜はn型でキャリア密度は $4 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ である。薄膜作製時の酸素圧力を $10^{-6} \text{ Torr}$ に固定した条件で作製した薄膜は、原子間力顕微鏡像に見られるように、ウルツ鉱型の晶癖を反映し、六角柱状のサイズの揃ったナノ結晶が緻密に充填した構造をもつ。一つ一つのナノ結晶上には、一ユニットセル高さ(0.5nm)のステップによるスパイラル構造が見られることから、熱力学的平衡に近い条件下で成長していることが示唆される。成長条件の制御により、ナノ結晶の横方向のサイズは50nm~250nm程度の間で制御できる。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 光半導体素子において、酸化亜鉛を添加した薄膜を発光層とすることを特徴とする光半導体素子。

【請求項2】 請求項1記載の光半導体素子において、前記薄膜に存在する粒界を共振器となし、室温での励起子によるレーザー発振を可能にしたことを特徴とする光半導体素子。

【請求項3】 請求項1又は2記載の光半導体素子において、前記薄膜は、レーザー分子線エピタキシー法による酸化亜鉛六角柱ナノクリスタル薄膜である光半導体素子。

【請求項4】 請求項1記載の光半導体素子において、前記発光層から発生した紫外光または青色光を励起光とし、蛍光層を発光せしめるカラー表示が可能な光半導体素子。

【請求項5】 光半導体素子の製造方法において、レーザー分子線エピタキシー法により、サファイヤc面基板上に酸化亜鉛を添加した薄膜からなる発光層を形成することを特徴とする光半導体素子の製造方法。

【請求項6】 光半導体素子の製造方法において、サファイヤc面基板上に酸化亜鉛を添加した薄膜を形成する際、ナノクリスタルのサイズと密度を決定する核生成工程と該核を成長させる工程に分離して薄膜を形成することを特徴とする光半導体素子の製造方法。

## 【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、光半導体素子に係り、特に、発光素子、レーザー素子、カラー表示素子及びその製造方法に関するものである。

【0002】

【従来の技術】従来、青色・紫外領域の発光素子で実用されているもの、もしくは実用が期待されている材料は、主にIII族-窒化物、II族-セレン化物・硫化物の化合物半導体のみである。以下、その各種の発光素子について説明する。

【0003】(1)【III族-窒化物】としての(A1-Ga-In)N混晶系の場合は、

(a)欠陥密度が非常に多いにもかかわらず発光する。その発光波長は、390～430nmである。

(b)発光波長450nmの青色発光ダイオードはすでに実用化されている。

(c)発光波長408nmの青色レーザーダイオードの室温連続発振が報告されている。

といった特徴を持っている。

【0004】(2)【II族-セレン化物・硫黄物】としての(Zn-Cd-Mg)(Se-S)混晶系の場合は、

(a)GaAs基板との格子整合がよく、成長も低温で行うことができる。

(b)発光波長430～500nmである。

といった特徴を持っている。

【0005】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、III族-窒化物、II族-セレン化物・硫化物の化合物半導体では、酸素の混入は大きな問題となる。また、個別的には、

(1)(Al-Ga-In)N混晶系の場合は、

(a)作製に高温(～1200℃)を要する。

【0006】(b)サファイヤ基板と劈開性が相違し、共振器端面の形成が困難である。

(c)格子整合する適当な基板がない。

(d)活性層がIn添加GaNであり、発光波長が長くなる。

(e)レーザー発振閾値が大きい。

(2)(Zn-Cd-Mg)(Se-S)混晶系の場合は、

(a)発光寿命が短い。

【0007】(b)非常に長い研究期間(1980年～)での進歩を考えると、実用化は困難である。

といった問題点を持っていた。本発明は、上記問題点を除去し、酸化亜鉛(ZnO)の温室における紫外光のレーザー発振現象に基づく光半導体素子を提供することを目的とする。

【0008】

【課題を解決するための手段】本発明は、上記目的を達成するために、

【1】光半導体素子において、ZnOを添加した薄膜を発光層とするようにしたものである。

【2】上記【1】記載の光半導体素子において、前記薄膜に存在する粒界を共振器として利用するとともに、室温での励起子によるレーザー発振を可能にするようにしたものである。

【0009】【3】上記【1】又は【2】記載の光半導体素子において、前記薄膜は、レーザー分子線エピタキシー法によるZnO六角柱ナノクリスタル薄膜である。

【4】上記【1】記載の光半導体素子において、前記発光層から発生した紫外光または青色光を励起光とし、蛍光層を発光せしめるカラー表示を可能とするようにしたものである。

【0010】【5】光半導体素子の製造方法において、レーザー分子線エピタキシー法により、サファイヤc面基板上にZnOを添加した薄膜からなる発光層を形成するようにしたものである。

【6】光半導体素子の製造方法において、サファイヤc面基板上にZnOを添加した薄膜を形成する際、ナノクリスタルのサイズと密度を決定する核生成工程とこの核を成長させる工程に分離して薄膜を形成するようにしたものである。

【0011】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施の形態を詳細に説明する。光機能性酸化物としては、固体レーザー結晶やフォトリソグラフィ結晶といったいわゆる「光学結晶」がその代表的なものである。その多くは、バンドギャップが4 eV以上の絶縁体であり、強誘電性・圧電性磁性を利用して電気・光・磁気・音により光を制御し得る機能を有する。

【0012】ここで取り扱う光機能性酸化物は、半導体としての光機能、すなわちキャリアの結合による光子の生成という機能をもつものである。本発明は、ZnOの温室における紫外光のレーザー発振現象を呈する光半導\*

\*体素子を得るようにしたものである。以下、本発明の実施例について詳細に説明する。

【0013】ZnOは、紫外光領域に吸収端( $E_g = 3.2 \text{ eV}$ )をもつワイドギャップII-VI族半導体酸化物である。光記録密度の向上を目指した青色・紫外領域の化合物半導体レーザーの材料として研究されているII族ナイトライド及びII族セレン化物・サイルファイドと比較した物性パラメーターを表1に示す。

【0014】

【表1】

| 材料       | $E_g(\text{eV})$ | $\mu$ | $\epsilon$ | $r_B$ | $E_b^{1/2}(\text{meV})$ | $a$  | $c$  | $T_m(^{\circ}\text{C})$ |
|----------|------------------|-------|------------|-------|-------------------------|------|------|-------------------------|
| ZnO(ウルツ) | 3.2              | 0.19  | 8.5        | 18    | 60                      | 3.24 | 5.20 | 1970                    |
| GaN(ウルツ) | 3.4              | 0.16  | 9.5        | 31    | 24                      | 3.19 | 5.19 | 1700                    |
| ZnSe(ZB) | 2.7              | 0.14  | 9.1        | 35    | 22                      | 5.67 | —    | 1520                    |
| ZnS(ZB)  | 3.6              | 0.2   | 8.3        | 22    | 40                      | 5.41 | —    | 1850                    |

$E_g$ : 室温におけるバンドギャップ、 $\mu$ : 励起子の還元有効質量、 $\epsilon$ : 誘電率(Lc軸)  
 $r_B$ : 励起子のボーア半径、 $a$ および $c$ : 格子定数、 $T_m$ : 融点

【0015】これらの材料と比較すると、例えば同じウルツ鉱に属するGaNとはバンドギャップや格子定数などの点で類似であるが、注目すべき点は、ZnOの励起子の結合エネルギー( $E_{bex}$ )が60 meVと極めて大きいことである。励起子とは結晶中に励起される素励起単位であり、水素原子のように一对の電子とホールから形成されている。励起子は、ボーズ粒子であるため、非常に高効率のレーザーダイオードが実現されるとして期待されている。低温では励起子の再結合による発光過程が支配的であるが、室温では熱エネルギー(24 meV)により、弱い結合の励起子は存在できなくなる。

【0016】その結果、例えばGaAs/AlGaAs系赤色半導体レーザーがそうであるように、レーザー発光過程は、解離した電子とホールの高密度状態(エレクトロン・ホール・プラズマ)により支配される。この観点からZnOの非常に大きい励起子結合力は、デバイス応用上だけでなく励起子系の物性研究という点からも魅力的である。実際、低温におけるZnOの励起子発光及びレーザー発振はかなり研究されてきているが、室温での励起子によるレーザー発振の報告例はなかった。

【0017】原子レベルで制御された酸化物エピタキシャル薄膜成長に有効なレーザー分子線エピタキシー法(MBE)を用いて、サファイヤc面基板上に作製されたZnO薄膜は、X線ロックングカーブの半値幅は0.1°と非常に高い結晶性を有している。薄膜はn型で、キャリア密度は $4 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ であった。薄膜作製時の酸素圧力を $10^{-6} \text{ Torr}$ に固定した条件で作製した薄膜は、図1に示す原子間力顕微鏡像(AFM)像に見られるように、ウルツ鉱型の晶癖を反映し、六角柱状のサイズの揃ったナノ結晶が緻密に充填した構造をもつ。一つ一つのナノ結晶上には、一ユニットセル高さ

(0.5 nm)のステップによるスパイラル構造が見られることから、熱力学的平衡に近い条件で成長していることが示唆される。成長条件の制御により、ナノ結晶の横方向のサイズは70 nm~250 nm程度の間で制御できる。なお、図1においては、膜厚が200 nmの薄膜のZnOナノ結晶のAFM像(1  $\mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ )を示している。ナノ結晶の平均サイズはおおよそ250 nmである。図のエリアは、100 nm $\times$ 100 nm、図の外矢印は結晶の方位を示している。結晶の方位は薄膜表面の六角形の方位と正確に一致している。

【0018】図2にはナノ結晶のサイズの分布のヒストグラムを示している。薄膜の厚さが200 nmの場合、平均値として257 nmのサイズで、その広がりが37%と、非常にサイズの揃ったナノ結晶で構成されている。つまり、AFM像から六角形ナノクリスタルのサイズ分布を求めた。サイズのバラッキ具合をナノクリスタルの平均サイズ( $\phi_{\text{average}}$ )で割った値 $\Delta\phi$ は、37.3%であり、他の手法(MBE、MOCVD)で作られた他の物質(GaAs, GaN, InAs, etc)のサイズのバラッキに関する一般的に報告されている値に比して、固定度が、より小さい値になっている。

【0019】図3にはナノ結晶のサイズの膜厚依存性を示す。膜厚が厚くなるにつれて、ナノ結晶のサイズが70 nm程度から徐々に大きくなっている。このような薄膜は、繰り返し使用したZnOターゲットを使用した場合に形成できる。このZnOターゲットの表面は、ZnOの一部還元されて、表面に亜鉛金属が析出している。ZnOターゲットが未使用である場合には、図3の(I)で示したように、更に小さい(50 nm)ナノ結晶を形成できる。この(I)に関しては、工夫された作製方法で作製された複数の薄膜のサイズを示している。

(I) のエリアに入る膜だけが、後に述べる励起子-励起子発光 ( $P_{\infty}$  発光) を示す。点線は通常の方法で作られた膜のナノクリスタルサイズの膜厚に対する変化を示している。

【0020】この薄膜のAFT像 ( $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ ) を図4に、この粒子のサイズとヒストグラムを図5に示す。この図5は図1及び図2と同様である。異なる点は、膜厚が50nmであり、平均サイズが45nmで、分布が33%とナノサイズ結晶のサイズを微小化できる点である。この効果は、十分酸化された粒子が基板上に供給された場合、表面での拡散距離が小さく高粒度な粒子が形成されるのに対し、十分に酸化されていない金属亜鉛原子が主に供給される場合、表面での拡散距離が長くなり、粗な粒子形式が形成されると共に、薄膜の膜厚を増していくうちに粒子が融合していることで説明できる。

【0021】微細な粒子薄膜を得る方法として、以下の方法がある。

(1) 表面が十分に酸化されているZnOターゲットを使用する方法以外に、以下の方法も使用可能である。

(2) ターゲットの表面状態によらず、薄膜作製時の酸素圧力を $10^{-5} \sim 1\text{ Torr}$ の範囲で選択し、1nm程度の薄膜を形成し、任意の密度で核生成を行い、後に残りの薄膜を $10^{-6} \sim 10^{-3}\text{ Torr}$ で形成し、高品質ナノ結晶を形成する。ナノ結晶の融合の速度は、二段階目の酸素圧力で制御する。

【0022】図4に示した50nm程度のナノ粒子薄膜の断面の形状(透過電子顕微鏡像)を図6に示す。この図は、六角形の辺に平行な方向の断面を見ており、図中の矢印は、粒界 (grain boundaries) のある位置を示している。粒界の位置は、図3のAFM像で黒く見える部分に対応しており、図4及び図6からナノクリスタルの形は厚さ50nm、横方向のサイズが50nmの六角柱のボックス状であることがわかる。

【0023】このように、個々のナノ結晶の境界に、基板面と垂直に明瞭な粒界が形成されている。この粒界が形成される原因を以下に述べる。ZnOとサファイアc面の原子の配列は、図7のように、18%のミスマッチを有する。しかし、ZnOの11格子とサファイアの13格子、あるいはZnOの5格子とサファイアの6格子を比べると、そのミスマッチは0.085%又は1.4%と非常に小さくなる。

【0024】このような基板と薄膜のそれぞれの格子間距離の公倍数の繰り返し周期を持つマッチングはハイパーオーダーエピタキシーと呼ばれ、Si基板上へのTiN薄膜の形成等で報告されているが、酸化物と酸化物の界面での報告例はない。ハイパーオーダーエピタキシーでの粒界の発生機構を図8に示す。説明を簡単にするため、基板結晶の3格子に対して、膜結晶の4格子がマッチングした図で示す。基板上に、ハイパーオーダーエ

タキシー条件を満たした核がランダムに発生して、それらの核が横方向に成長する時、粒同士がぶつかる。この時、核と核の公倍数のとり方の位相には相関がないので、公倍数の端数の隙間が生じる。この隙間は結晶格子が乱れて粒界となる。それぞれの粒は方向関係が完全に一致しているが、横方向の位置がずれている。この粒界は、後述するように、エキシトンの閉じ込め障壁として機能し、レーザー共振器のミラーを構成する。

【0025】この薄膜は、室温において、紫外光領域において明瞭な励起子発光を示した。図9にNd:YAG 1/3波長レーザー (355nm, 30psec) による光励起-発光スペクトルを示す。発光スペクトルは、励起パワーの増大と共に、自由励起子発光 ( $E_{ex}$ )、ついで励起子-励起子 ( $P_2$ ) 自然発光を示し、その後、閾値強度 ( $I_{th}$ )、 $24\text{ kW/cm}^2$  からポンピング強度の8乗で強度が増大する強い発光 ( $P_{\infty}$ )、そして  $I_{th} = 55\text{ kW/cm}^2$  から5乗で強度が増大する発光 (N) によるスペクトルの飽和を示している。

【0026】 $P_2$  及び  $P_{\infty}$  発光線は、励起子と励起子の衝突・散乱過程を伴う励起子の再結合による発光により説明できる。 $n=1$  の状態にある二つの励起子が衝突し、一つの励起子が  $n=2$  ( $P_2$  発光) もしくは、 $n=\infty$  ( $P_{\infty}$  発光) の状態にたたき上げられ、残ったもう一つの励起子が再結合して発光する。N発光線は、励起強度の増大と共にレッドシフトとブロードニングを示すことより、前述のエレクトロン-ホール・プラズマ発光であると考えられる。

【0027】ナノ結晶のサイズが250nm程度と大きい場合の発生スペクトルを図10に示す。レーザー発振が起こる  $I_{th}$  は  $62\text{ kW/cm}^2$  と非常に大きい。また、 $P_2$  や  $P_{\infty}$  発光が観測されず、いきなり、N発光が起こっている。効率の良い  $P_{\infty}$  発光は、ナノ結晶のサイズを40~60nmに制御した時のみ観測された。

【0028】また、レーザー発振の閾値が非常に小さいこととナノ結晶サイズが大きい時は  $P_{\infty}$  発光は見られないことより、ナノ結晶によるキャリア (励起子) の閉じ込めによる振動子強度の増大が起きていると推測できる。 $P_{\infty}$  発光は、薄膜の横方向からスペクトルをとっても明瞭に観測される。このときポンピングレーザーは物理的な端面より内側の薄膜だけを励起しており、人工的な共振ミラーは存在していない。

【0029】図11にTE ( $\perp c$ ) 及びTM ( $\parallel c$ ) 偏光で測定された  $P_{\infty}$  発光スペクトルを示す。つまり、 $P_{\infty}$  発光を横方向から見た時のスペクトルであり、 $I_{th} = 24\text{ kW/cm}^2$  を示している。発光線は、TE偏光への強い集中と細かくスプリットしたスペクトル構造を示している。図12に示しているように、スプリット間隔 ( $\Delta E$ ) は、励起している領域の長さ (励起長: L) に依存して変化する。これは、 $P_{\infty}$  発光が励起領域の両端をミラーとする縦モードキャビティーからのレーザー

発振であることを示している。

【0030】図13にレーザー発振強度の角度依存性を示す。円板状の基板にナノ結晶を形成し、試料を回転させてレーザー光強度を測定した。励起領域が六角柱結晶粒界を共振器ミラーとして利用できる場合は強い発光が観測できるのに対し、30°ずれた場合は発光が弱くなる。これは、粒界が共振器ミラーとして作用していることを示している。

【0031】励起領域の両端が共振器を構成するミラーとして作用する起源は、以下のように説明される。励起されている領域は、キャリア密度が大きいため屈折率が励起されていない部分よりも大きくなる。励起領域のエッジでは、励起強度は連続的に変化しており、薄膜の屈折率の同様な分布をしていると考えられる。ある屈折率閾値を仮定すると、屈折率連続変化領域にあるナノ結晶列とナノ結晶列の粒界面でのみ光の反射が起こり、両側の端面間にファブリ・ペロー共振器が形成される。

【0032】断面TEM観察から粒界は、基板・薄膜界面から表面までc軸に平衡に形成されていることから、ナノ結晶の粒界面が高い平行度と反射率を持ったミラー面として機能していると考えられる。この自己形成キャビティーミラーは、劈開もしくはエッチングによるミラー形成プロセスを必要としないだけでなく、ダイオードに適当な形状の電極をつけることによって、任意に活性領域を選べ、また、共振器を設置できるという利点を与えることができる。

【0033】以上に示した励起子レーザー発振閾値の温度依存性を図14に示す。膜厚50nmの薄膜について、結晶温度に対する横方向P $\infty$ 発光の閾値励起強度の値をプロットしており、縦軸はLogスケールを示している。この図から明らかなように、温度が室温(300K)以上に上昇すると、閾値は徐々に増加するが、380K(100℃)程度までは、励起子発生のレーザー発振が観測された。このグラフの傾きから、特性温度は、157Kとなり、ZnSeの124Kより大きくレーザー材料として優れていることがわかる。

【0034】図15にGaNとZnOにおけるレーザー発振閾値の推移を示す。GaN系レーザーダイオードでは、薄膜の品質向上、量子井戸やクラッド層といった構造を採用して年々閾値は低減している。本発明による自然形成されたZnOナノ結晶薄膜のレーザー発振閾値は、その最良値よりも小さい。従って、ZnO薄膜は、短波長レーザー材料として非常に有望であると言える。

【0035】ガリウム砒素ダブルヘテロレーザーダイオードが現在、コンパクトディスクのピックアップレーザー等に応用され、最もポピュラーなレーザーダイオードである。実際に実用化することのできるレーザー閾値の目安として挙げている。励起子発光を積極的に利用したレーザーダイオードの発振閾値は、これを超えると予想されている。今後ZnOのダイオードにダブルヘテロ構

造や光閉じ込め構造を併用することで、更に励起子発光の効率を上げることができと思われる。

【0036】なお、本発明は上記実施例に限定されるものではなく、種々の変更や応用が考えられる。たとえば、ZnOの添加に代えて、マグネシウムもしくはカドミウムを添加するようにしてもよい。更に、ZnO薄膜から紫外光発光を利用すると、以下のようなカラーディスプレイが形成できる。

【0037】従来は、青、緑、赤の三基本色の発生ダイオードを組み合わせることで、カラーディスプレイが形成されてきたために、非常に多数のダイオードを用いてディスプレイを組み立てる工程が必要であった。ZnOからは紫外光の発光が得られるため、大面積のディスプレイ用基板上に多数のZnO紫外光発光ダイオードを集積して形成し、各素子に青、緑、赤の蛍光層を付加し、ZnOダイオードからの紫外光励起により蛍光層を発光せしめることで、カラーディスプレイが形成できる。ZnOは600℃以下の低温でも結晶成長が可能であるため、ガラス基板等の安価で大面積の基板が使用可能となる利点もある。

【0038】なお、本発明は、青色から紫外光領域で発光する光半導体素子(LED、レーザーダイオード)、光記憶ディスク(CD、MO、DVD)のピックアップ用レーザー、発光ダイオードを用いたフラットパネルディスプレイ、発光ダイオードを用いた信号機等の表示部、殺菌灯等の照明等に用いる光半導体素子として、広汎な適用分野を有する。

【0039】また、本発明は上記実施例に限定されるものではなく、本発明の趣旨に基づいて種々の変形が可能であり、これらを本発明の範囲から排除するものではない。

【0040】

【発明の効果】以上、詳細に説明したように、本発明によれば、

- (1) レーザー発振のための共振器の作製が不要であり、構造が簡単な光半導体素子を得ることができる。
- (2) ダイオードに電極をとるだけで、活性領域を任意に形成することができる。

【0041】(3) 室温で励起子-励起子散乱過程によりレーザー発振する。

(4) 半導体レーザー素子のレーザー発振閾値を著しく低減化することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の実施例を示す膜厚200nmのZnOナノクリスタル薄膜の原子間力顕微鏡像を示す図である。

【図2】本発明の実施例を示す膜厚200nmのZnO薄膜におけるナノクリスタルサイズの分布状態を示す図である。

【図3】本発明の実施例を示す膜厚とナノクリスタルサ

イズの関係を示す図である。

【図4】本発明の実施例を示す膜厚50nmのZnOナノクリスタル薄膜の原子間力顕微鏡像を示す図である。

【図5】本発明の実施例を示す膜厚50nmのZnO薄膜におけるナノクリスタルサイズの分布を示す図である。

【図6】本発明の実施例を示す膜厚50nmのZnO薄膜の断面透過型電子顕微鏡像を示す図である。

【図7】本発明の実施例を示すZnO薄膜とサファイア基板の界面模式図（ハイヤーオーダーエピタキシー）である。

【図8】本発明の実施例を示すインコヒーレント粒界の発生に関する説明図である。

【図9】本発明の実施例を示す膜厚50nmのZnOナノクリスタル薄膜における発光スペクトルを示す図である。

る。

【図10】本発明の実施例を示す膜厚200nmのZnOナノクリスタル薄膜における発光スペクトルを示す図である。

【図11】本発明の実施例を示すP $\infty$ 発光の縦モード偏光スペクトルを示す図である。

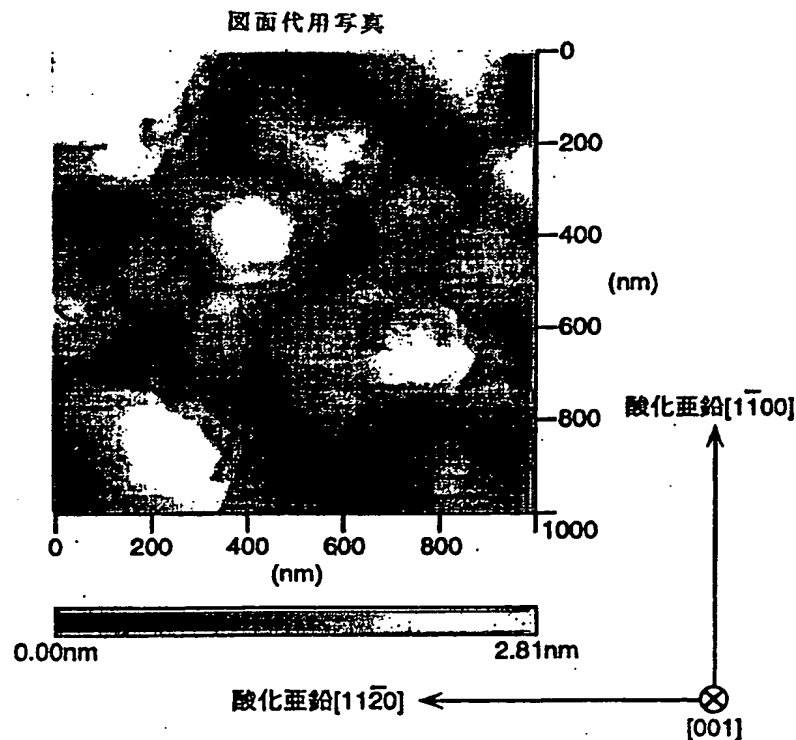
【図12】本発明の実施例を示すモード間隔と励起長の関係を示す図である。

【図13】本発明の実施例を示すP $\infty$ 発振強度の角度依存性を示す図である。

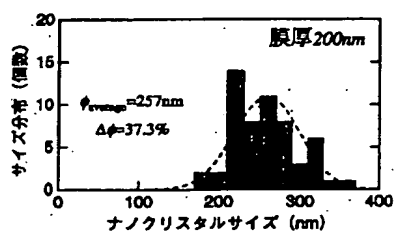
【図14】本発明の実施例を示す結晶温度とレーザー発振閾値の関係を示す図である。

【図15】Ga $\bar{N}$ とZnOにおけるレーザー発振閾値の推移を示す図である。

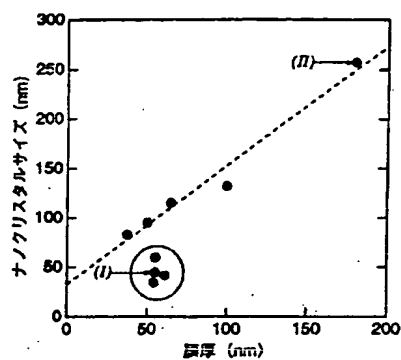
【図1】



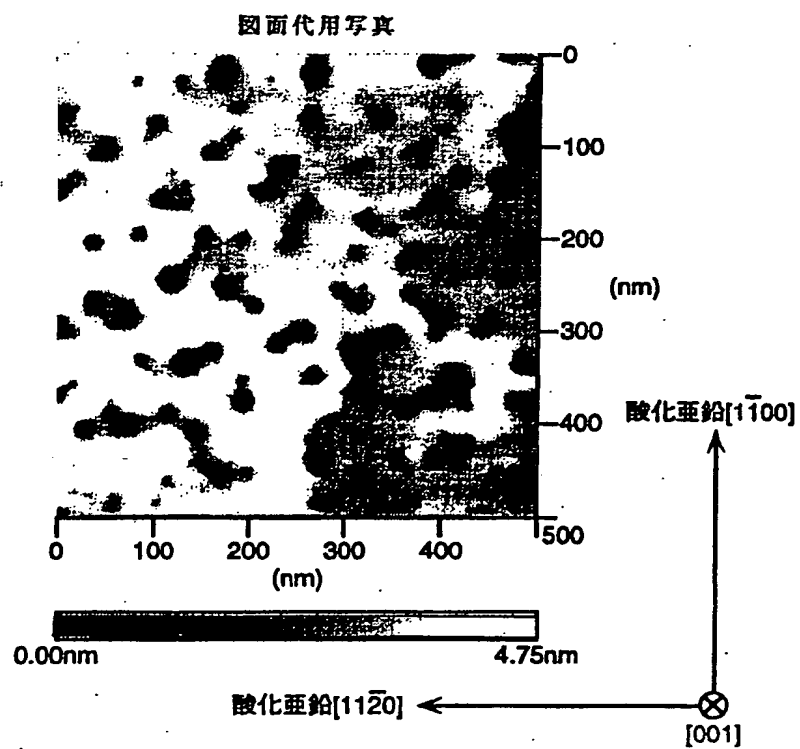
【図2】



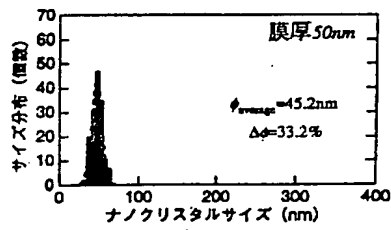
【図3】



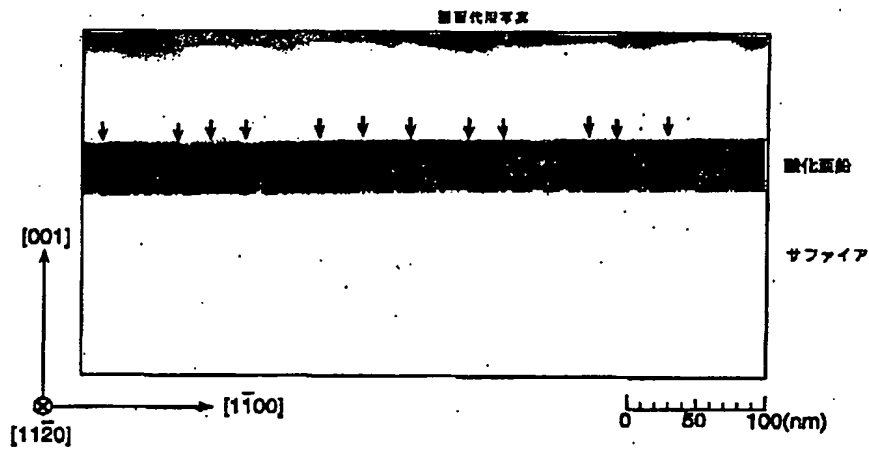
【図4】



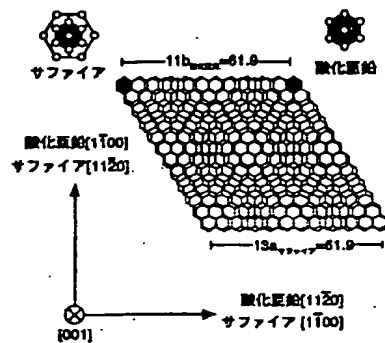
【図5】



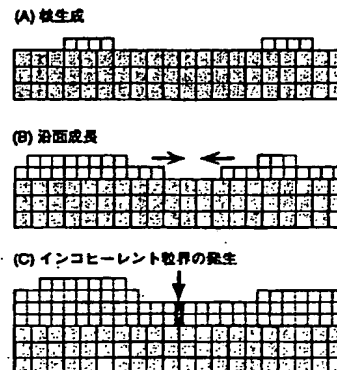
【図6】



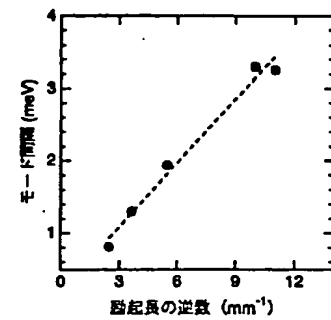
【図7】



【図8】

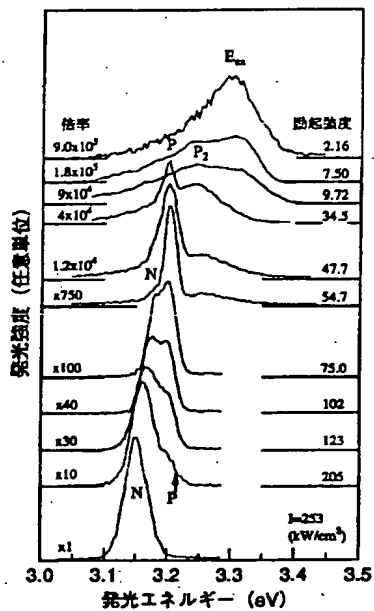


【図12】

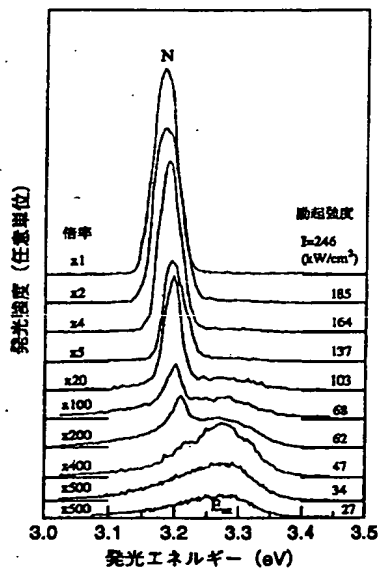




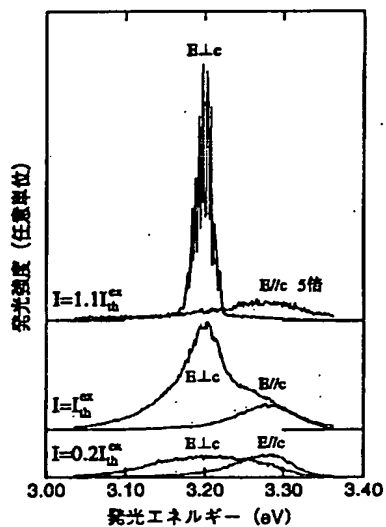
【図9】



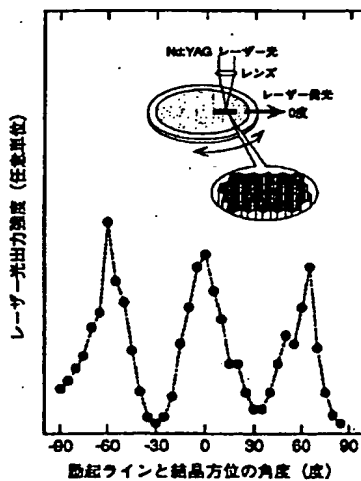
【図10】



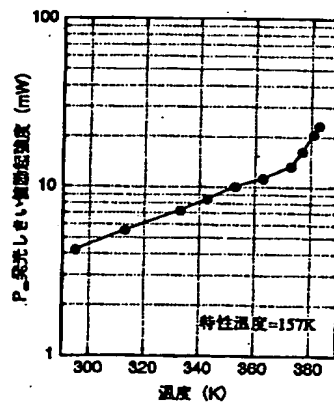
【図11】



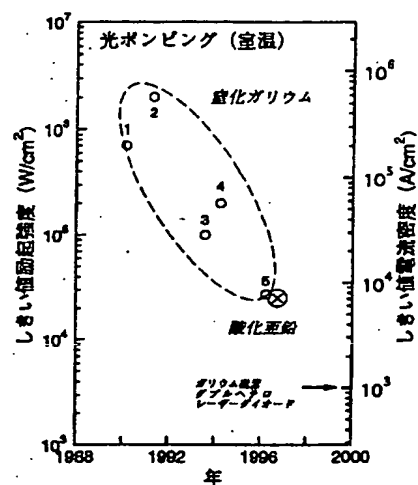
【図13】



【図14】



【図15】




---

フロントページの続き

(51)Int.Cl.<sup>6</sup>

H01L 33/00

識別記号

FI

H01L 33/00

D